

**И. Н. Градусов<sup>\*</sup>, П. А. Рябинкина, А. Е. Йорх**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

<sup>\*</sup> *dontknowalrdu@gmail.com*,

Научный руководитель – доц., канд. техн. наук А. А. Никулина

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ МУЛЬТИФАЗНОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ

Приведены результаты структурных исследований железоуглеродистого гетерофазного сплава, полученного искровым плазменным спеканием частиц сталей 12Х18Н10Т и У8. Микроструктура была исследована с использованием методов световой микроскопии. Также была проведена оценка микротвердости основных структурных составляющих, и определено влияние времени выдержки и температуры спекания на микротвердость аустенита и переходной области. Толщина области взаимодействия разнородных микрообъемов варьируются от  $0,8 \pm 0,54$  до  $8,8 \pm 2,33$  мкм в зависимости от режимов спекания.

*Ключевые слова:* разнородные стали, искровое плазменное спекание, хромоникелевая сталь, углеродистая сталь, гетерофазный сплав, железоуглеродистый сплав, микроструктура, микротвердость.

***I. N. Gradusov, P. A. Ryabinkina, A. E. Yorh***

## STRUCTURAL FEATURES OF MULTI-PHASE STEEL, OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING

Results of the structure investigation of heterophase iron-carbon alloys which were obtained by spark plasma sintering of carbon (1080) and chrome-nickel (321) steel powders were presented. The microstructure was investigated by light microscopy. The microhardness of the main structures was analyzed. Also the influence of the holding time and sintering temperature on the microhardness of the austenite and the transition area was determined. The thickness of the transition area varied from  $0.8 \pm 0.54$  to  $8.8 \pm 2.33$   $\mu\text{m}$ , depending on the sintering modes.

*Keywords:* dissimilar steels spark plasma sintering, chrome-nickel steel, carbon steel, iron-carbon alloy, dual phase steel, multiphase steel, microstructure, microhardness.

**Введение.** Искровое плазменное спекание относится к современным технологиям порошковой металлургии. Технология характеризуется быстрым и равномерным спеканием токопроводящих частиц с приложением одноосного давления [1, 2]. Искровое плазменное спекание

позволяет получать гетерофазные материалы, в том числе железоуглеродистые сплавы [3].

Гетерофазные железоуглеродистые материалы относятся к прогрессивным конструкционным материалам, обеспечивающим высокую прочность и надежность. Среди них выделяют двухфазные и многофазные сплавы. Их механические свойства зависят от долей перлита, мартенсита, феррита и аустенита [4–7]. Благодаря высокой прочности и способностями к деформированию гетерофазные железоуглеродистые стали зарекомендовали себя как перспективный конструкционный материал, который уже активно используется, например, в автомобильной промышленности [7].

Целью работы являлось исследование структурных особенностей гетерофазного сплава, полученного методом искрового плазменного спекания стружки сталей 12Х18Н10Т и У8.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Получить гетерофазный материал искровым плазменным спеканием при различных режимах.
2. Исследовать микроструктуру образцов посредством световой и растровой электронной микроскопии.
3. Провести оценку микротвердости сформированных фаз.

**Материалы и методы исследования.** Частицы хромоникелевой и углеродистой сталей были получены механическим способом. Перемешивание проводилось в планетарной мельнице в течение 20 минут со скоростью вращения барабана 100 об/мин. Режимы спекания, при которых были получены образцы, представлены в табл. 1.

Структурные исследования проводились с использованием светового микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Alm*. Локальный химический анализ был проведен с помощью растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP* с энергодисперсионным спектрометром.

Таблица 1

Режимы искрового плазменного спекания смеси стружки разнородных сталей

Температура выдержки, °С	Время выдержки, мин			Давление, МПа	Средняя скорость нагрева, °С/мин
1000	5	15	25	60	100
1100	5	15	25		

**Результаты и обсуждения.** Общий вид образца, полученный с помощью светового микроскопа, представлен на рис. 1, а. Образцы содержат зоны с феррито-перлитной, аустенитной и мартенситной структурами. Также было установлено, что с увеличением времени выдержки и температуры спекания возрастала объемная доля перлита в

приповерхностных слоях спеченных образцов. Это связано с насыщением данных областей атомами углерода, диффундирующими из графитовой бумаги, защищающей стенки пресс-формы.

Область взаимодействия частиц разнородных сталей представлена на рисунке 1б. Было установлено, что область взаимодействия разнородных микрообъемов состоит из структур мартенсита и остаточного аустенита. Значения толщины областей с аустенито-мартенситной структурой варьировались от  $0,8 \pm 0,54$  до  $8,8 \pm 2,33$  мкм в зависимости от режимов спекания. Данные по средней толщине переходного слоя для некоторых образцов приведены в табл. 2. С увеличением времени выдержки и температуры спекания толщина переходной зоны возрастает.

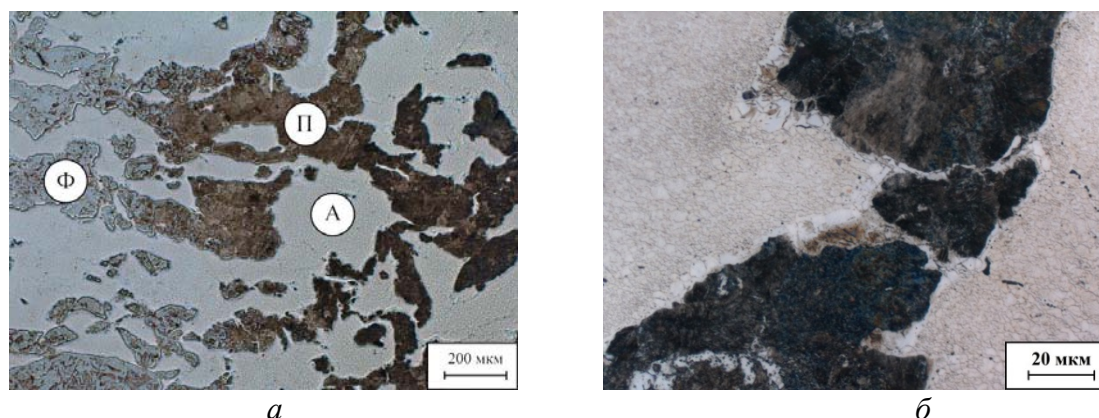


Рис. 1. Микроструктура многофазной стали: *а* – общий вид материала; *б* – область взаимодействия разнородных микрообъемов; А – аустенит; П – перлит ; Ф – феррит

Данные спектрального анализа, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что зона взаимодействия разнородных микрообъемов обладает промежуточным составом между перлитной и аустенитной фазами, вследствие чего в ней образовался мартенсит.

Таблица 2

Толщина переходных слоев в спеченных образцах в зависимости от температуры спекания и времени выдержки

Температура\Время	5 мин	15 мин	25 мин
1000 °С	$0,8 \pm 0,54$ мкм	$2,2 \pm 0,60$ мкм	$5,3 \pm 1,22$ мкм
1100 °С	$4,6 \pm 1,34$ мкм	$5,6 \pm 1,76$ мкм	$8,8 \pm 2,33$ мкм

Значения микротвердости аустенитных областей в образцах, спеченных при больших температуре и времени выдержки, повышается. Среднее значение микротвердости аустенита в образце, спеченном при 1100 °С с временем выдержки 25 мин, составило  $601 \pm 83$  HV. Значение микротвердости переходной зоны достигает  $828 \pm 89$  HV.

Таблица 3

## Результаты спектрального анализа

Хим. элемент, % вес.	Cr	Ni	Ti	Si	Mn	C	Fe
Перлитная фаза	–	–	–	0,45	0,98	1,05	ост.
Аустенитная фаза	14,35	11,36	0,52	0,77	1,49	1,40	ост.
Переходная зона	7,71	1,50	–	0,51	1,06	1,19	ост.
Карбидная фаза	35,59	6,58	0,39	0,33	1,37	5,41	ост.

**Выводы.** В результате структурного исследования железоуглеродистого гетерофазного сплава, полученного искровым плазменным спеканием, было установлено, что микроструктура образцов содержит фазы феррита, перлита, аустенита и мартенсита. Уровень микротвердости аустенита и аустенито-мартенситной области повышается с увеличением времени выдержки и температуры спекания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology / M. Tokita // J. Soc. Powd. Tech. 1993. Vol. 30. P. 790–804.
2. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: a review of the spark plasma sintering method / Z. A. Munir [et al.] // Journal of Materials Science. 2006. Vol. 41. P. 763–777.
3. Microstructure and mechanical properties of a spark plasma sintered Ti–45Al–8.5Nb–0.2W–0.2B–0.1Y alloy / X. Lu [et al.] // Intermetallics. 2009. V. 17. P. 840–846.
4. Qguzhan K. Phase steels in relation with the austenite-to-ferrite transformation mechanisms / K. Qguzhan, Y. Servet // Journal of Materials Science. 2011. Vol. 46. P. 7026–7038.
5. Movahed P. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets / P. Movahed, S. Kolahgar, N. Parvin // Materials Science and Engineering: A. 2009. V. 518. P. 1–6.
6. Xiong Z. P. Pereloma Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting / Z. P. Xiong, N. E. Kostyrychev [at al.] // Materials and Design. 2015. V. 88. P. 537–549.
7. Kuziak R. Advanced high strength steels for automotive industry: a review / R. Kuziak, R. Kawalla, S. Waengler // Arch. Civ. Mech. 2008. V. 89. P. 103–117.
8. Krebs B. Banded structure in Dual Phase steels in relation with the austenite-to-ferrite transformation mechanisms / B. Krebs // Journal of Materials Science. 2011. Vol. 46. P. 7026–7038.
9. Никулина А. А. Формирование неоднородной структуры железоуглеродистых сплавов спеканием частиц разнородных сталей / А. А. Никулина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 3 (72). С. 52–61.